

การศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของช่องระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซ
A Study of Efficiency Enhancement of Internal Cooling Passage in Gas Turbine
Blade

นริศร์ พัฒนประเทศ¹ และ วรารักษ์รัตน์ จันทสาโร^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: fengvrj@ku.ac.th, โทร 089-201-7160

บทคัดย่อ

บทความเสนอการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนของอากาศในช่องระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k- ϵ ร่วมกับ Enhanced wall treatment เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและแก้ปัญหาการสูญเสียความดัน งานวิจัยนี้ทำการตัดแปลงรูปทรงบริเวณข้อของของช่องทางการไหลแล้ววิเคราะห์ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Performance Factor, TPF) ซึ่งได้จากสัดส่วนของค่าการถ่ายเทความร้อน (Nusselt number, Nu) และค่าความเสียดทาน (Friction factor, f) อีกทั้งศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าการหมุน (Rotation number, Ro) ต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในช่องดังกล่าว ผลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวคิดในการพัฒนาระบบระบายความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซต่อไป

คำหลัก: ช่องระบายความร้อน; ใบพัดกังหันก๊าซ; แบบจำลองความปั่นป่วน

Abstract

The numerical simulation of turbulent flow and heat transfer of air in cooling passage in a gas turbine blade is established using Realizable k- ϵ turbulence model with enhanced wall treatment. To enhance heat transfer and reduce pressure drop, the bend geometry of the passage has been modified and thermal performance factor (TPF) which can be calculated from the ratio of Nusselt number (Nu) and friction factor (f) is investigated. Also the effect of rotation number (Ro) variation on the flow and heat transfer in the passage is studied. The results from this article can be used as an idea for developing the internal cooling system in gas turbine blade in the future.

Keywords: Internal cooling passage; Gas turbine blade; Turbulence model

1. บทนำ

กังหันก๊าซเป็นเครื่องยนต์ที่มีกำลังผลิตสูงและถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านต่างๆ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า ใบพัดกังหันก๊าซเป็นส่วนที่ต้องรองรับก๊าซร้อนที่มีความร้อนสูงจาก

ห้องเผาไหม้ จึงเป็นส่วนที่เกิดความเสียหายได้ง่าย ในการยืดอายุการใช้งานของใบพัดเทคนิคปล่อยสารทำความเย็นไหลผ่านช่องระบายความร้อนภายในใบพัด (internal cooling passage) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่นิยมใช้เพื่อนำความร้อนจากตัวใบพัด ช่องระบาย

ความร้อนแบบท่อขด (serpentine duct) ถูกใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมาก

หลายงานวิจัยให้ผลสอดคล้องกันว่าการหมุนของแกนใบพัด (rotation) เหนี่ยวนำให้เกิดการไหลวนทุติยภูมิ (secondary flow) และเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่อง [1] สำหรับรูปร่างหน้าตัดของช่องระบายความร้อน พบว่าช่องหน้าตัดไม่เป็นวงกลมจะมีการไหลแบบทุติยภูมิซึ่งเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่อง [2] ส่วนใหญ่จึงศึกษาช่องหน้าตัดไม่เป็นวงกลม โดยเฉพาะช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากมีความยาวด้านเท่ากันทุกด้านและมีมุมขนาดเท่ากันทุกมุม จึงไม่มีผลของความยาวด้านหรือขนาดของมุมที่มาจำกัดการเกิด secondary flow ดังเช่นช่องสามเหลี่ยม [3] อีกทั้งช่องระบายความร้อนภายในใบพัดของจริงนั้นมีความกว้างต่อความสูงของช่องระบายความร้อน (Aspect Ratio, AR) หลายค่า ตั้งแต่ประมาณ 0.25–4 ซึ่งงานของ Fu และคณะ [4] พบว่าช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแต่ช่องที่มีค่า AR ต่างกันมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนใกล้เคียงกัน ดังนั้นช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีค่า AR=1 ซึ่งเป็นค่ากลางจึงถูกเลือกมาใช้ในงานนี้

มีการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในช่องสี่เหลี่ยม เช่น Siddique [5] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบขดสองรอบซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยช่อง 180 องศา (หรือเรียกว่าท่อรูปตัวยู) โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k- ϵ ร่วมกับ Enhanced wall treatment และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าวโดยการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนหรือค่าตัวเลขเฉลี่ยกับผลการทดลองของ Jenkins และคณะ [6] ซึ่งทำการทดลองที่ค่าเรย์โนลด์

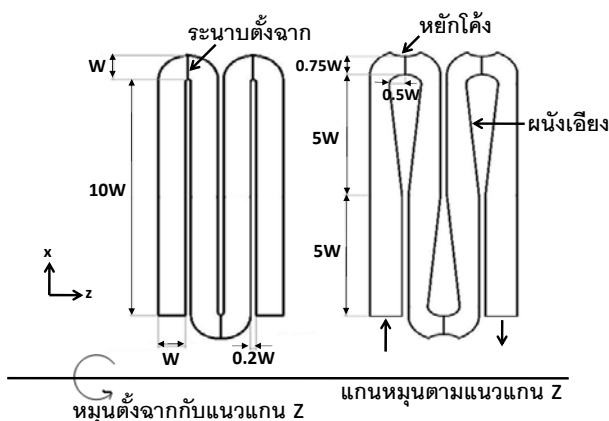
เท่ากับ 100,000 Saha and Acharya [7] ดัดแปลงรูปทรงบริเวณช่องของท่อรูปตัวยูผิวเรียบและศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในท่อดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k- ϵ ร่วมกับ Enhanced wall treatment กำหนดให้อุณหภูมิผนังท่อคงที่ Qiu และคณะ [8] ทำการทดลองศึกษาผลของการหมุนในท่อขดรูปตัวยูต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่คิดจากสัดส่วนของค่าตัวเลขเฉลี่ยและค่าความเสียหาย เป็นต้น

Karathanassis และคณะ [9] จำลองการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมขดสองรอบและสี่รอบพบว่า ท่อกลมขดสี่รอบมีการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแต่ความดันสูญเสียมากกว่าท่อขดสองรอบเนื่องจากความยาวท่อมากกว่า ซึ่งเมื่อนำทั้งสองมาเทียบค่าดัชนีสมรรถนะก็ยังต่างกันน้อยมาก และจากหลายงานวิจัยจะเห็นว่า บริเวณช่องของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเป็นบริเวณที่มีความดันสูญเสียมากที่สุด แต่ก็มีมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเนื่องจากเกิดความปั่นป่วนในบริเวณนี้มาก [10] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดสี่รอบ โดยศึกษาช่องระบายความร้อนที่มีการดัดแปลงรูปทรงบริเวณช่องเพื่อลดความดันสูญเสียโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน เสนอผลการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในช่องแบบปกติและแบบดัดแปลงเพื่อเปรียบเทียบค่าสมรรถนะเชิงความร้อน รวมไปถึงวิเคราะห์ผลของค่าการหมุน (Rotation number, Ro) ต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในช่องขดสี่รอบที่ผ่านการดัดแปลงนี้

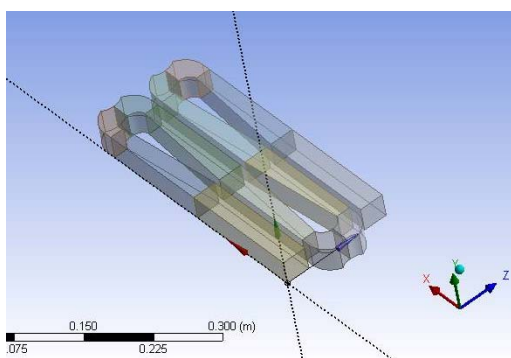
2. รายละเอียดการจำลอง

2.1 ลักษณะของปัญหา

รูปทรงของช่องระบายความร้อนในงานนี้เป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขดสี่รอบแบบปกติและแบบดัดแปลง ดังรูปที่ 1 แบบปกติคือบริเวณช่องอเป็นท่อรูปตัวยู พื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดทั้งท่อ มีความกว้าง (W) และความสูง (H) ของทางไหลเข้าเท่ากับ 0.03048 m ส่วนแบบดัดแปลงคือ มีการดัดแปลงบริเวณช่องตามแนวคิดของ Saha and Acharya [7] โดยมีการเอียงผนังด้านในช่องเพื่อลดการแยกชั้นของไหล (flow separation) และเพิ่มส่วนหยักโค้งเข้าที่ผนังด้านนอกช่องเพื่อลดพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลัน เป็นการเร่งอัตราการไหลและเพิ่มความปั่นป่วนในการไหล



รูปที่ 1 ช่องระบายความร้อนแบบปกติ (ซ้าย) และแบบดัดแปลง (ขวา)



รูปที่ 2 แสดง Geometry ของช่องระบายความร้อนใน CFD

การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนในงานนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มใน Fluent (steady state pressure based solver and COUPLED algorithm for pressure-velocity coupling) ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน realizable $k-\epsilon$ ร่วมกับการใช้ enhanced wall treatment สำหรับในบริเวณใกล้ผนังซึ่งมีการไหลในช่วง Viscous sublayer โดยใช้ค่า $y^+ = 0.5$ สำหรับ first grid point สถานะการไหลเข้าสู่ท่อขดเป็นแบบ fully developed velocity profile ซึ่งได้จากการจำลองการไหลภายในท่อตรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาว $x = 30W$ โดยความเร็วในการไหลเข้านั้นทำให้ค่าเรย์โนลด์ที่ขึ้นกับ hydraulic diameter (D_h) เท่ากับ 25,000 สมมติให้อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าท่อขดเท่ากับ 273 K และความดันขาออกเท่ากับความดันบรรยากาศ (101,325 Pa) ผนังทุกด้านของช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีอุณหภูมิ (T_w) คงที่เท่ากับ 298 K และมีความเร็วการไหลที่ผนังเท่ากับ 0 (no slip condition) โดยในส่วนของเปรียบเทียบช่องการไหลแบบปกติและแบบดัดแปลงจะกำหนดให้ผนังอยู่กับที่ (stationary wall) และในส่วนของการศึกษาผลของการหมุนจะกำหนดให้ผนังเคลื่อนที่ (Rotation wall) โดยมีความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ 250,500,750,1000 rpm (คิดเป็นค่าการหมุนเท่ากับ 0.067,0.133,0.200,0.266 ตามลำดับ)

2.2 สมการที่เกี่ยวข้อง

ช่องระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพคือมีการถ่ายเทความร้อนภายในช่องดีและมีความดันสูญเสียน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงวัดประสิทธิภาพของช่องการไหลโดยใช้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Performance Factor, TPF) ซึ่งได้จาก

สัดส่วนของค่าการถ่ายเทความร้อนหรือค่านัสเซิล (Nu) และค่าความเสียดทาน (f)

$$TPF = \frac{Nu / Nu_0}{(f / f_0)^{1/3}}$$

ค่านัสเซิลคำนวณจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ซึ่งหาจากฟลักซ์ความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บริเวณผนัง (q_w , W/m^2) และอุณหภูมิของอากาศ (T_b , K) ที่ได้จากการจำลอง

$$Nu = \frac{hD_h}{k}$$

$$h = \frac{q_w}{(T_w - T_b)}$$

ค่านัสเซิลจะเปลี่ยนแปลงตามค่าเรย์โนลด์ (Re) ของการไหล [11] ดังนั้นเพื่อตัดผลกระทบของค่าเรย์โนลด์ จึงต้องนอร์มอไลซ์ค่านัสเซิลด้วยความสัมพันธ์ของ Dittus and Boelter [12] สำหรับค่านัสเซิลของการไหลแบบ fully developed ในท่อผิวเรียบ (Nu_0)

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$$

ค่าความเสียดทานคำนวณจากความดันสูญเสีย (Δp) ตลอดช่วงความยาว (Δx) โดยการนอร์มอไลซ์ค่าความเสียดทานใช้สมการของ Karman-Nikuradse [13] สำหรับค่าความเสียดทานในท่อผิวเรียบ (f_0)

$$f = \frac{\Delta p / 0.5\rho v^2}{4\Delta x / D_h}$$

$$f_0 = 0.046Re^{-0.2}$$

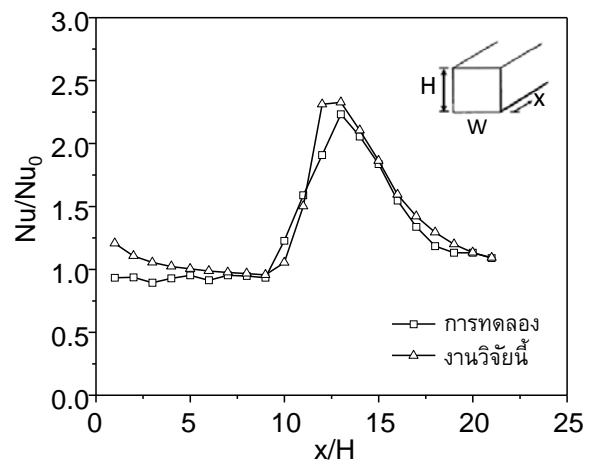
สำหรับกรณีที่มีการหมุนของช่องระบายความร้อน ค่าการหมุน (Ro) คำนวณจากสัดส่วนของค่าเรย์โนลด์ของการไหลผ่านช่อง (Re) และค่าเรย์โนลด์ของการไหลแบบหมุน (Re_Ω) โดย Ω คือความเร็วในการหมุน (rad/s)

$$Ro = \frac{Re_\Omega}{Re} = \frac{\Omega D_h}{v}$$

3. ผลการจำลองและการวิเคราะห์

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องและจำนวนกริด

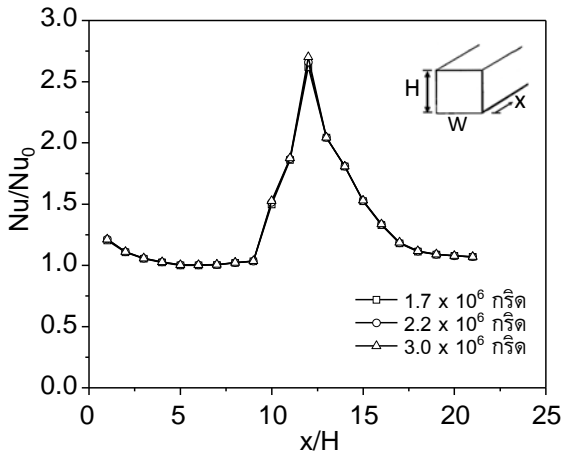
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการจำลอง ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองค่านัสเซิลกับผลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนในช่องขดสองรอบแบบปกติภายใต้ลักษณะปัญหาแบบเดียวกันที่ได้จากงานของ Saha and Acharya [7] จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าผลการจำลองในงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ 8 % และสามารถทำนายแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนภายในช่องนี้ได้



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนกับผลการทดลอง

ในการหาผลกระทบของจำนวนกริดต่อผลการจำลองได้ทำการจำลองการไหลช่องขดสองรอบแบบตัดแปลงโดยเปลี่ยนแปลงจำนวนกริดมีค่าเท่ากับ 1.7×10^6 , 2.2×10^6 และ 3×10^6 จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนกริดผลการจำลองค่านัสเซิลก็ยังคง

ใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างกันไม่เกิน 3% ดังนั้นจึงเลือกใช้การตั้งค่ากริดแบบเดียวกันที่ทำให้ได้จำนวนกริดต่ำสุดนี้มาใช้กับการจำลองไหลในช่องขดสี่รอบแบบปกติและดัดแปลงต่อไป

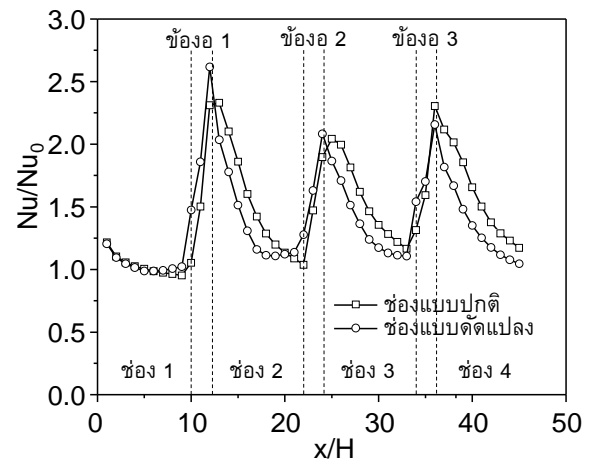


รูปที่ 4 ผลการจำลองค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากจำนวนกริดต่างๆ

3.2 การเปรียบเทียบช่องขดแบบปกติและดัดแปลง

ค่าการถ่ายเทความร้อนของช่องขดสี่รอบแบบปกติและแบบดัดแปลงแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าตัวเลขของช่องทั้งสองแบบคล้ายกัน กล่าวคือ ในช่องที่ 1 ซึ่งการไหลเป็นแบบ fully developed ในท่อตรงค่าตัวเลขมีค่าประมาณ 1 ค่าตัวเลขจะเพิ่มขึ้นตอนไหลผ่านช่องอและสูงสุดที่ตำแหน่งการไหลปะทะของของไหลที่ออกมาจากช่องอกับผนังช่อง พอเริ่มเข้าสู่ช่องขดที่ 2 ค่าตัวเลขจะลดลงเรื่อยๆและกลับมาเพิ่มขึ้นเมื่อไหลเข้าช่องอ แนวโน้มสลับเพิ่มขึ้นเมื่อไหลเข้าช่องอและลดลงเมื่อไหลเข้าช่องตรงไปเรื่อยๆจนกระทั่งไหลออกผ่านช่องสุดท้ายด้วยค่าตัวเลขประมาณ 1 เมื่อเปรียบเทียบช่องทั้งสองแบบพบว่า ในช่วงการไหลผ่านบริเวณช่องอ ค่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณช่องอของช่องแบบดัดแปลงมีค่าสูงกว่าของช่องแบบปกติ โดยเฉพาะเมื่อไหลออกจากช่องอที่หนึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนของ

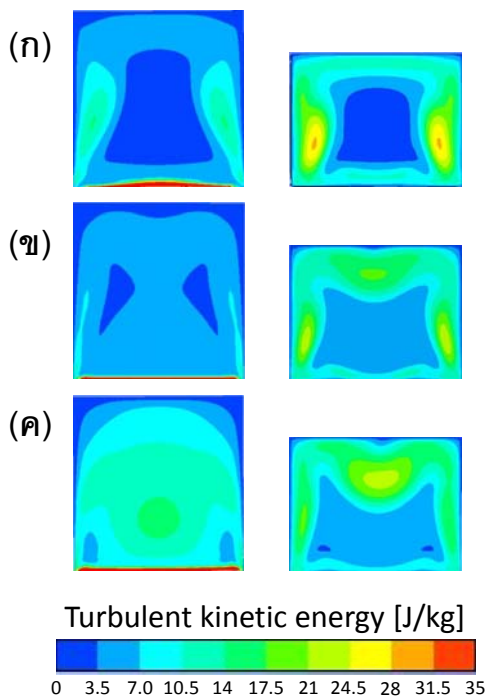
ช่องแบบดัดแปลงนั้นเพิ่มขึ้นไปจนมีค่าสูงถึง 2.6 เนื่องจากช่องอแบบโค้งหยักทำให้ความเร็วในการไหลปะทะกับผนังช่องบริเวณนั้นมากขึ้น เมื่อไหลผ่านช่องอถัดๆไปการถ่ายเทความร้อนภายในช่องอของช่องแบบดัดแปลงลดลงมาเหลือประมาณเดียวกับช่องแบบปกติ ส่วนบริเวณช่องที่สอง สามและสี่ (ไม่รวมช่องอ) ของช่องแบบดัดแปลงมีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าช่องแบบปกติเล็กน้อย เนื่องจากการใช้ผนังลาดเอียงไปลดความปั่นป่วนบางส่วนที่เกิดจากการแยกชั้นของไหล



รูปที่ 5 ค่าการถ่ายเทความร้อนของช่องแบบปกติและแบบดัดแปลง

พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนบนระนาบตั้งฉากกับทิศการไหลหลักบริเวณกึ่งกลางช่องอแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่า ทุกระนาบมีการหมุนวนของอากาศอันเป็นผลมาจากแรงเหวี่ยงของการไหลผ่านทางโค้งเข้าช่องอ ในช่องอที่หนึ่งมีขนาดของการไหลหมุนวนมากที่สุดและความแรงของการหมุนวนนี้จะลดลงในช่องอที่สอง ในขณะที่ในช่องอที่สาม ศูนย์กลางการไหลหมุนวนย้ายมาอยู่บริเวณกลางช่องมากขึ้นและขนาดของการไหลหมุนวนเพิ่มขึ้นจากช่องอที่สองเล็กน้อย สอดคล้องกับแนวโน้มค่าการถ่ายเทความร้อนภายในช่องอที่สามมากกว่าช่องอที่สองเล็กน้อย

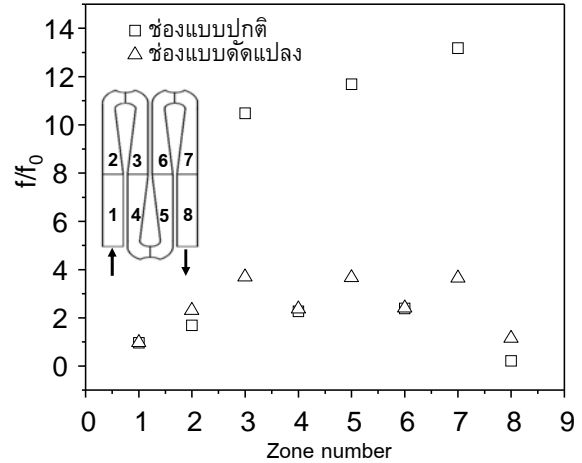
(รูปที่ 5) แสดงถึงผลของขนาดการไหลหมุนวนต่อค่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณช่องอ เมื่อเปรียบเทียบช่องทั้งสองแบบพบว่าเกิดการหมุนวนในช่องอของช่องที่มีการตัดแปดมากกว่าช่องแบบปกติ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มส่วนโค้งหยักเพื่อเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดภายในช่องออย่างฉับพลันทำให้เกิดความปั่นป่วนจากการไหลหมุนวนมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนภายในช่องอแบบตัดแปด (โดยเฉพาะช่องอที่หนึ่งและสอง) ดีกว่าช่องอแบบปกติ



รูปที่ 6 พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนในช่องอที่ (ก) หนึ่ง (ข) สอง และ (ค) สาม ของช่องแบบปกติ (ซ้าย) และแบบตัดแปด (ขวา)

ในส่วน of ค่าความเสียหายของการไหลภายในช่องดังรูปที่ 7 คำนวณจากความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านโซนต่างๆของช่อง จะเห็นว่าในโซนที่ 3, 5 และ 7 ซึ่งเป็นบริเวณขาออกจากช่องอที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ช่องแบบตัดแปดมีค่าความเสียหายลดลงจากแบบปกติมาก ในขณะที่โซนอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน การลดลงนี้เป็นผลมาจากการใช้

ผนังลาดเอียงลดการแยกชั้นของของไหลเมื่อไหลออกจากช่องอ ทำให้ความดันสูญเสียบริเวณดังกล่าวน้อยลง



รูปที่ 7 ค่าความเสียหายของช่องแบบปกติและแบบตัดแปด

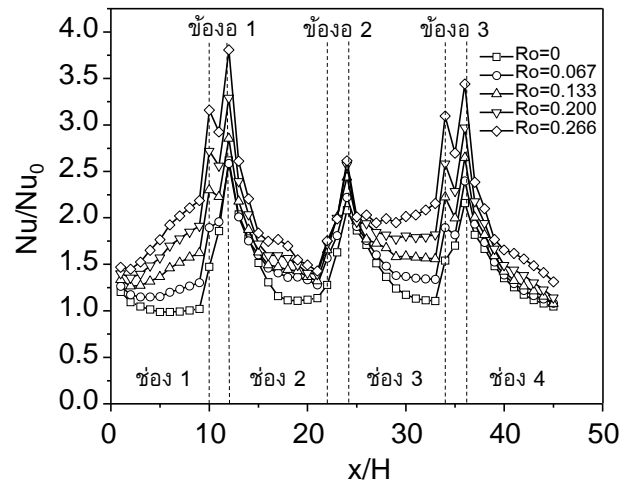
ในการคำนวณค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวมของช่องระบายความร้อน ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยรวมคิดจากค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยและอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในช่องทั้งหมด ในขณะที่ค่าความเสียหายโดยรวมคิดจากความดันสูญเสียและความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านความยาวท่อทั้งหมด ค่าต่างๆดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 พบว่า การตัดแปดบริเวณช่องอทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวมเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 23% เป็นผลมาจากการใช้ผนังลาดเอียงทำให้มีการสูญเสียความดันระหว่างการไหลลดลง ซึ่งถึงแม้ผนังลาดเอียงจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงด้วย (รูปที่ 5) แต่การใช้ช่องอที่มีส่วนหยักโค้งก็ช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนโดยรวมให้ขึ้นมาใกล้เคียงกับแบบปกติ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการตัดแปดบริเวณช่องอในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของช่องระบายความร้อนในเชิงการไหลได้เป็นอย่างดีโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพโดยรวมของช่องแบบปกติ และดัดแปลง

บริเวณช่อง	Nu/Nu_0	f/f_0	TPF
แบบปกติ	1.39	5.95	0.77
แบบดัดแปลง	1.35	2.88	0.95

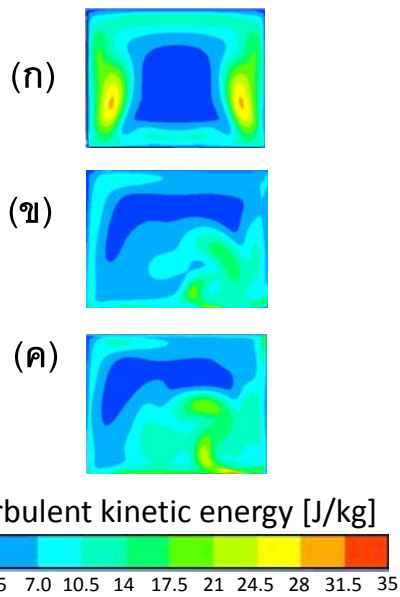
3.3 ผลของค่าการหมุนต่อการถ่ายเทมวลและความร้อน

การหมุนช่องระบายความร้อนเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเหวี่ยงและแรง Coriolis ส่งผลให้เกิดการไหลหมุนวนทุติยภูมิในทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลหลัก มีส่วนช่วยในการถ่ายเทมวลและความร้อนของของไหลภายในช่อง [14] จากแนวโน้มค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปที่ 8 ให้ผลสอดคล้องว่าการเพิ่มค่าการหมุนทำให้ค่าสเกลในทุกระยะภายในช่องเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดโน้มนำในบริเวณก่อนเข้าสู่ช่องที่หนึ่ง ($x/H=10$) ค่าสเกลของช่องที่มี $Ro = 0.266$ (1000 rpm) เพิ่มขึ้น 114% จากช่องที่อยู่นิ่ง ในขณะที่ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งการไหลปะทะของช่องไหลที่ออกจากช่องที่หนึ่งกับผนัง ($x/H=12$) ในช่วงค่าการหมุนที่ทำการศึกษา การหมุนส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนในช่องที่หนึ่งและสามมากกว่าช่องที่สองและสี่ โดยช่องที่หนึ่งและสามมีทิศการไหลออกจากศูนย์กลางการหมุน ในขณะที่ช่องที่สองและสี่มีทิศการไหลเข้าสู่ศูนย์กลางการหมุน



รูปที่ 8 การถ่ายเทความร้อนของช่องที่มีค่าการหมุนต่างๆ

ในส่วนของการถ่ายเทมวล จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าเมื่อช่องอยู่นิ่ง (0 rpm) พลังงานจลน์ความปั่นป่วนมีขนาดใหญ่อยู่บริเวณด้านข้างของช่อง โดยที่ตรงกลางช่องจะไม่มีทิศการไหลหมุนวน การเพิ่มค่าการหมุนโดยหมุนช่องด้วยความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของทิศการไหลหมุนวนไปยังบริเวณกลางช่องมากขึ้น จึงทำให้ค่าสูงสุดของพลังงานจลน์ความปั่นป่วนลดลง การกระจายตัวนี้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความปั่นป่วนภายในช่องซึ่งส่งผลให้สามารถถ่ายเทมวลและความร้อนที่ได้รับจากผนังท่อไปสู่อากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าในบริเวณกลางท่อได้ดีขึ้น



รูปที่ 9 การไหลหมุนวนในช่องที่หนึ่งของช่องที่มีค่าการหมุนเท่ากับ (ก) $Ro=0$ (ข) $Ro=0.133$ และ (ค) $Ro=0.266$

4. สรุปผลการทดลอง

การดัดแปลงรูปทรงของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดสี่รอบในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของช่องระบายความร้อนได้ เมื่อเทียบกับช่องแบบขดสี่รอบที่มีช่องอรูปร่างด้วยแบบปกติ การใช้ผนังเอียงสามารถลดการสูญเสียความดันจากการไหลผ่านช่องได้มาก แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในบางบริเวณลดลงเนื่องจากการลดลงของความปั่นป่วนจากการแยกชั้นของไหล การเพิ่มส่วนหยักโค้งที่ช่องจะสามารถชดเชยการลดลงของค่าการถ่ายเทความร้อนนี้ได้โดยทำให้การถ่ายเทความร้อนในช่องเพิ่มขึ้น การดัดแปลงเหล่านี้ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวมของช่องเพิ่มขึ้น 23% โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของช่องระบายความร้อนในเชิงการไหลโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพเชิงความร้อน การเพิ่มค่าการหมุนโดยเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนและให้ค่าเรย์โนลด์ของการไหลผ่านช่องคงที่ ($Re = 25,000$) เป็นการเพิ่มการกระจายตัวของ

การไหลหมุนวนภายในช่องส่งผลให้การถ่ายเทมวลและความร้อนภายในช่องระบายความร้อนดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณ คุณวีระศักดิ์ หอมกระจาย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Han, J.C., Dutta, S. and Ekkad, S.V. (2000). *Gas turbine heat transfer and cooling technology*, Taylor & Francis, New York.
- [2] Pattison, M.J., Premnath, K.N. and Banerjee, S. (2009). Computation of turbulent flow and secondary motions in a square duct using a forced generalized lattice Boltzmann equation, *Physical Review E*, vol. 79(2), Article number 026704.
- [3] Dutta, S., Han, J.C. and Lee, C.P. (1996). Local heat transfer in a rotating two-pass ribbed triangular duct with two model orientations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39(4), pp. 707 – 715.
- [4] Fu, W.L., Wright, L.M. and Han, J.C. (2006). Rotational buoyancy effects on heat transfer in five different aspect-ratio rectangular channels with smooth walls and 45 degree ribbed walls, *Journal of Heat Transfer*, vol. 128(11), pp. 1130 – 1141.
- [5] Siddique, W. (2011). Design of internal cooling passages investigation of thermal

- performance of serpentine passages, *Doctoral Thesis, KTH Industrial Engineering and Management*, Stockholm, Sweden.
- [6] Jenkins, S.C., Zehnder, F., Shevchuk, I.V., Von Wolfersdorf, J., Weigand, B. and Schnieder, M. (2008). The Effect of Ribs and Tip Wall Distance on Heat Transfer for a Varying Aspect Ratio Two-Pass Ribbed Internal Cooling Channel, *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, vol. 4(PART B), pp. 1051 – 1061.
- [7] Saha, K. and Acharya, S. (2013). Effect of bend geometry on heat transfer and pressure drop in a two-pass coolant square channel for a turbine, *Journal of Turbomachinery*, vol. 135(2), Article number 021035.
- [8] Qiu, L., Deng, J., Sun, Z., Tao, Z. and Tian, S. (2013). Pressure drop and heat transfer in rotating smooth square U-duct under high rotation numbers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 66, pp. 543 – 552.
- [9] Karathanassis, I.K., Papanicolaou, E., Belessiotis, V. and Bergeles, G.C. (2014). Numerical heat transfer, Part A: Applications: An international journal of computation and methodology, *Journal of Numerical heat transfer*, vol. 66(4), pp. 349 – 378.
- [10] Shen, Z., Xie, Y., Zhang, D. and Xie, G. (2014). Numerical calculations on flow and heat transfer in smooth and ribbed two-pass square channels under rotational effects, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, Article number 981376.
- [11] Hwang, G.J., Tzeng, S.C. and Mao, C.P. (1999). Heat transfer of compressed air flow in a spanwise rotating four-pass serpentine channel, *Journal of Heat Transfer*, vol. 121(3), pp. 583 – 591.
- [12] Dittus, F.W. and Boelter, L.M.K. (1930). Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, *University of California Publications in Engineering*, vol. 2(13), pp. 443 – 461.
- [13] Kays, W.M. and Crawford, M.E. (1993). *Convective Heat and Mass Transfer*, 3rd edition, McGraw-Hill, New York.
- [14] Servouze, Y. and Sturgis, J.C. (2003). Heat transfer and flow field measurements in a rib-roughened branch of a rotating two-pass duct, *2003 ASME Turbo Expo*, Atlanta GA, United States.